Experimentelle Untersuchungen über die Dehnbarkeit der Sklera.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Medizinischen Fakultät

der

Friedrich-Alexander-Universität zu Erlangen

vorgelegt von

Hans Schwab
aus Erlangen.

NÜRNBERG
DRUCK RUDOLF KERN
1938

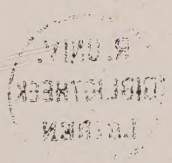
1938/141

Referent: Prof. Dr. H. Schmelzer.
Dekan: Prof. Dr. R. Greving.

Tag der mündlichen Prüfung: 22. April 1938.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meinen lieben Eltern gewidmet.



Inhaltsübersicht.

Seite

Einleitung 5

Problemstellung 5
Literaturübersicht 6
Erklärung der gebräuchlichen Fachausdrücke 12

Beschreibung der eigenen experimentellen Untersuchungen 15

Beschreibung der Apparatur 15
Eichung der Apparatur 18
Beschreibung des Ganges der Versuche 22
Versuchsergebnisse 28

Ergebnisse der 1. Meßreihe 29
Ergebnisse der 2. Meßreihe 32
Ergebnisse der 3. Meßreihe 33
Ergebnisse der 4. Meßreihe 34

Zusammenfassung 35

Literaturverzeichnis 38

Lebenslauf 39

Einleitung: Problemstellung.

Die Pathologie des Glaukoms ist bis zum heutigen Tage voller ungelöster Probleme. So ist insbesondere das Verhalten der Hüllen des Auges bei einer intraokularen Druckerhöhung und umgekehrt das Verhalten des intraokularen Druckes bei Veränderungen der Hüllen des Auges noch ungeklärt. Als wesentlichste der Augenhüllen kommt hierbei die Sklera in Betracht, da sie einerseits das Auge fast vollkommen einhüllt, andererseits das straffere und in mechanischer Hinsicht widerstandsfähigere Gewebe darstellt. Man wird sich daher wohl zunächst darauf beschränken können, bei einer Untersuchung des Verhaltens der Augenhüllen lediglich die mechanischen Verhältnisse der Sklera zu prüfen. In der Tat haben sich auch alle bisherigen Arbeiten in dieser Richtung auf das Skleralgewebe beschränkt.

Von den mechanischen Eigenschaften der Sklera interessiert in erster Linie ihre Dehnungsfähigkeit. Um diese zu messen, sind zwei grundsätzlich verschiedene Wege beschreitbar: Erstens kann man isolierte Gewebsstreifen einer Belastung aussetzen und die sich ergebende Längenänderung messen, zweitens kann man die Elastizität der Augapfelhüllen am intakten Bulbus zu prüfen versuchen, um die physiologischen Bedingungen möglichst zu wahren. Diesen Weg haben z. B. K o s t e r und V o g e l s a n g beschritten. K o s t e r (7) hat die Veränderung der Bulbusgröße bei Druckänderung gemessen, V o g e l s a n g (14) hat die Methode der sogenannten ballistischen Elastometrie verwendet.

Diesen Untersuchungsmethoden gegenüber erscheint die Methode des isolierten Streifens wesentlich einfacher, fragt sich nur, ob sie überhaupt angewendet werden darf. Vor allem ist dabei die Auswertung der Ergebnisse einfacher als z. B. die Auswertung der elastometrischen Kurven V o g e l s a n g s , da für diese wohl erst die mathematischen Grundlagen noch besser begründet werden müßten.

Ueber Untersuchungen am isolierten Skleralstreifen liegen bereits eine Reihe von Arbeiten vor. Auf diese Arbeiten wird im folgenden noch näher einzugehen sein. Hier möge lediglich

vorweggenommen werden, daß letzten Endes die Ergebnisse all dieser Arbeiten durchaus unbefriedigend blieben und kaum erlaubten, Schlüsse irgendwelcher Art auf die Dehnbarkeit der Sklera zu ziehen. Deswegen sollte in dieser Arbeit versucht werden, durch besondere experimentelle Untersuchungen in dieser Frage weiter zu kommen. Auch bei meiner Versuchsanordnung wird ein Streifen gleicher Breite aus der Sklera ausgeschnitten und die Längenänderung des Streifens bei Belastung mit verschiedenen Gewichten gemessen. Es wurde zur Messung aber eine von anderen Untersuchern noch nicht benutzte Apparatur verwendet, die es wahrscheinlich machte, damit eher zu befriedigenden Ergebnissen zu gelangen. Daher glaubte Prof. Schmelzer mich zu der Arbeit veranlassen zu sollen, um zumindest in kritischer Besprechung dann den Stand des Problems klären zu können.

Literaturübersicht.

Bevor ich auf meine eigenen Versuche näher eingehe, will ich eine kurze Uebersicht über die bisher vorliegenden Arbeiten geben. Da Vogelsang (14) und Heymann (3) die einschlägige Literatur erschöpfend anführten, darf ich mich wohl darauf beschränken, lediglich die Arbeiten, die sich mit der Methode des isolierten Streifens befassen, kurz zu beleuchten.

Weber (15) geht von der Erkenntnis aus, daß die Elastizität der Bulbuskapsel „wesentlich modifizierend auf den Gang der Drucksteigerung einwirken kann". Er sucht nach einem numerischen Ausdruck für die Ausdehnbarkeit der Sklera, welche den ansehnlichsten Teil der Bulbuskapsel darstellt und daher vor allem hier in Frage kommt. Er schnitt 3—5 mm breite Streifen der Sklera in äquatorialer wie meridionaler Richtung aus möglichst frischen menschlichen Augen und klemmte dieselben mittels zweier Quetschschrauben an beiden Enden fest ein. Die eine Quetschschraube diente zum Aufhängen, die andere zum Anbinden einer Waagschale. Etwas über der unteren Quetschvorrichtung befestigte er eine Borste senkrecht zur Längsachse des Streifens, die als Zeiger diente. Er versuchte nun aus seinen zahlreichen Versuchsergebnissen das Elastizitätsmodul*) des Skleralgewebes zu berechnen. Er erhielt aber immer abweichende Resultate, so daß es ihm als „mathematischer Unsinn" erschien, daraus

*) Was man unter Elastizitätsmodul versteht, wird auf Seite 12 dieser Arbeit erklärt.

einen Mittelwert zu ziehen und diesen Mittelwert als Elastizitätsmodul des Skleralgewebes zu bezeichnen. In der Kritik dieses negativen Ergebnisses ist er der Ansicht, daß es auf diesem Wege überhaupt unmöglich ist, einen irgend gültigen Wert zu erhalten, da es nicht möglich ist, den Skleralstreifen in seiner ganzen Ausdehnung gleichmäßig zu spannen, denn die der inneren Oberfläche zugehörige Seite des Streifens wird stärker gedehnt als die der Außenfläche, da sie aus einem kleineren Kreis ausgeschnitten ist. Die einzelnen gefundenen Elastizitätsmodula schwanken zwischen 200 und 832 g. — Angaben über die Höhe der Belastung, bei der diese Werte gefunden wurden, fehlen.

Ischreyt (4) kritisiert die Ergebnisse Webers. Dessen negatives Ergebnis führt Ischreyt einerseits auf die Verwendung von Leichenaugen zurück, die stets mehr oder weniger durch Fäulnis geschädigt gewesen, andererseits weist er darauf hin, daß Weber unberücksichtigt ließ, aus welchen Teilen der Skleralkapsel die Streifen entstammten. „Wir müssen überhaupt davon absehen, einen Elastizitätsmodul für die Sklera finden zu wollen: entsprechend ihrer Ungleichartigkeit und der verschiedenen Aufgaben ihrer Teile wird es deren mehrere geben. Daß außerdem individuelle Verschiedenheiten eine große Rolle spielen, ist selbstverständlich." Ischreyt verwendet zu seinen Versuchen einen Apparat, der im Prinzip der gleiche ist wie der von Weber benutzte. Lediglich konnte Ischreyt durch eine Hebelübertragung noch $^1/_8$ mm genau ablesen und $^1/_{16}$ mm abschätzen. Dafür kam aber die Borste als Zeiger in Wegfall. Ischreyt verwendete frisch enukleierte Augäpfel von Rindern und Schweinen, die bis zur Verarbeitung in einer schwachen, ungefähr $^1/_5$ Proz. Formaldehydlösung aufbewahrt wurden. Die Streifendicke wurde mit einem Zeiß'schen Dickenmesser bestimmt. In der ersten Versuchsreihe verwendet Ischreyt Rinderaugen. Die Streifendicke beträgt 5 mm, der Klammerabstand 30 mm. Es wird der Längenzuwachs für je 200 g Belastung bis zu einer Gesamtbelastung von 2000 g angegeben. In einer zweiten Versuchsreihe verwendet er Schweinsaugen. Die Streifenbreite beträgt 3 mm, der Klammerabstand 20 mm. Es wird von 100 zu 100 g belastet bis zu einer Gesamtbelastung von 1200 g. In dieser Versuchsreihe treten auffällig hohe Schwankungen in den Versuchsergebnissen auf. In einer dritten Versuchsreihe wird der Versuch gemacht, Unterschiede in der Dehnbarkeit gewisser Skleralpartien festzustellen. Es werden Schweinsaugen

verwendet. Die Streifenbreite beträgt 4 mm, der Klammerabstand 15 mm. Es erfolgt stufenweise Belastung von 100 zu 100 g bis zu einer Gesamtbelastung von 800 g. Es sind nur jeweils Mittelwerte aus einer größeren Anzahl von Messungen angegeben. Angaben über die Streuung der Einzelwerte fehlen.

Aus seinen Messungsergebnissen zieht Ischreyt folgende Schlüsse:

1. Die Längenzunahme der Skleralstreifen ist nicht proportional der Belastung, sondern nimmt bei steigender Belastung ab.

2. Der hintere Abschnitt der Sklera besitzt bei geringeren Graden von Belastung ein bedeutend geringeres Elastizitätsmodul als der vordere.

3. Bei stärkerer Belastung ist die Längenzunahme der hinteren Streifen eine geringere als diejenige der vorderen.

4. Aequatorial aus der vorderen Skleralhälfte geschnittene Streifen dehnen sich leichter als meridionale.

Bei späteren Untersuchungen (5) verwendet dann Ischreyt einen Zerreißapparat nach Hartig-Reusch-Pfuhl, wie er seinerzeit in der Textilindustrie zur Prüfung von Faserstoffen verwendet wurde. Mit dieser Apparatur konnte nur die Bruchbelastung und Bruchdehnung gemessen werden. Wohl wurde durch eine automatische Schreibvorrichtung ein Diagramm mit der Dehnung als Abszisse und der Belastung als Ordinate aufgenommen, aber die Kurven waren zu klein, um daraus viel mehr als ein rohes qualitatives Bild des Verlaufes des Dehnungsvorganges bei wachsender Belastung zu erhalten. Es werden Skleralstreifen von Rinderaugen verwendet. Die Breite beträgt 5 mm, die Länge variiert zwischen 8 und 23 mm. Es ergibt sich, daß Bruchdehnung und Bruchbelastung mit wachsender Streifenlänge abnehmen. Ischreyt sieht die Ursache hierfür in erster Linie in den Strukturverhältnissen des Gewebes, sagt aber, daß sicher auch lokale Schädigungen der Streifen, die beim Ausschneiden der Streifen entstehen und die um so häufiger zu erwarten sind, je länger der Streifen ist, eine erhebliche Rolle spielen. Bei der Untersuchung von Streifen aus verschiedenen Skleralgebieten ergibt sich folgendes: Die äquatorialen Limbusstreifen haben neben großer Bruchdehnung und großer

Bruchbelastung eine geringe mittlere Dehnbarkeit, die Anfangsdehnung ist sehr klein; die hinteren meridionalen Streifen haben große Bruchdehnung und Bruchbelastung, geringe mittlere Dehnbarkeit und eine so große Anfangsdehnung wie keine andere Streifenart. Die äquatorialen Streifen aus der Aequatorgegend zeigen größte Bruchdehnung bei geringster Bruchbelastung, die mittlere Dehnbarkeit ist groß. Die vorderen Meridionalstreifen zeigen sehr geringe Bruchdehnung, die Bruchbelastung steht zwischen der der hinteren Meridional- und Limbusstreifen, die mittlere Dehnbarkeit ist ziemlich groß, die Anfangsdehnung so gering wie bei keiner anderen Streifenart.

Da die Kurven für die geringeren Belastungsgrade wegen ihrer Kleinheit nur unbefriedigende Aufschlüsse gaben, verwendete Ischreyt zu seinen weiteren Versuchen einen Apparat, der dem bei seinen ersten Versuchen verwendeten sehr ähnlich war und lediglich in einigen Einzelheiten unbedeutende Verbesserungen aufwies. Es wurden 5 mm breite und 10 mm lange Skleralstreifen aus Rinderaugen verwendet und jeweils stufenweise von 50 zu 50 g bis zu einer Gesamtbelastung von 500 g belastet. Bei dieser Belastung war die Längenzunahme der Streifen aus der hinteren Kalotte bedeutend größer als aus der vorderen. Ferner zeigte sich wiederum, daß die Längenzunahme mit steigender Belastung abnimmt. Weiterhin ergab sich, daß schon bei geringer Belastung eine bleibende Verlängerung der Streifen eintritt und bei allen Versuchen sich die elastische Nachwirkung sehr störend bemerkbar macht. Auf eine Bestimmung der Streifendicke hat Ischreyt diesmal wegen der experimentellen Schwierigkeiten verzichtet.

Um diese Veröffentlichungen Ischreyts entstand nun ein wissenschaftlicher Streit zwischen Ischreyt und Koster, der eine teilweise unerfreuliche Form annahm, andererseits aber doch einige wesentliche Punkte, in denen die Methode des isolierten Streifens angreifbar ist, klar herausstellte. Schon vor den Veröffentlichungen Ischreyts sagt Koster (7) über die Versuche Webers, daß die Verhältnisse am intakten Bulbus, wo die Spannung durch den intraokularen Druck auf die Sklera in zwei Dimensionen einwirke und nicht wie beim isolierten Streifen in einer, doch etwas andere seien. Nach der ersten Veröffentlichung Ischreyts wendet sich dann Koster in einem Brief an Ischreyt, in dem er anscheinend dessen

Arbeitsmethoden angreift. Ischreyt (6) veröffentlichte darauf eine sehr polemische Erwiderung, die jedoch nichts wesentlich Neues bringt. Die darauf folgende Erwiderung Kosters (8) enthält dagegen einige sehr bedeutsame Einwürfe gegen die Versuche Ischreyts. Zunächst bringt darin Koster seine Ansicht zum Ausdruck, daß bei niedrigen Druckwerten die Bulbuskapsel weniger durch Dehnung der Sklera als vielmehr durch Annäherung des Auges an Kugelgestalt, also durch Formänderung, einer Aenderung des Volumens ausweiche. Weiterhin sagt er dann, daß man „über die Elastizität einer aus verflochtenen Fasern bestehenden Kapsel keine Ansicht gewinnen könne, wenn man die Fasern in einer Richtung durchtrennt, weil dadurch in dem Streifen das Gewebe eine ganz andere Lage und Form annehmen könne". Er berechnet dann, daß bei einem Rinderauge mit einem Bulbushalbmesser von 20 mm einem intraokularen Druck von 100 mm eine Belastung von 68 g entspreche, wenn der belastete Streifen 5 mm breit ist. Demnach liegen auch schon die kleinsten Belastungen in den Versuchen Ischreyts weit über der Grenze der größtmöglichen pathologischen Druckerhöhungen. Ferner stellt er fest, daß Ischreyt die Querkontraktion vollkommen außer Betracht ließ. Für die Annahme einer Poisson'schen Zahl m = 3 für das Skleralgewebe berechnet er, daß selbst unter Berücksichtigung der Querkontraktion eine viel zu große Dehnung bei entsprechender Belastung durch Ischreyt gefunden wurde im Vergleich zu den Messungen, die er selbst am intakten Bulbus durchführte.

An weiteren Untersuchungen am isolierten Streifen liegen dann nur noch Arbeiten über Bruchfestigkeit und Bruchdehnung der Sklera vor.

Casolino (2) verwendete Leichenaugen von Menschen im Alter von 0—79 Jahren. Die Augen wurden sofort nach dem Tode mittels Eisbeutel gekühlt und nach durchschnittlich 10—12 Stunden enukleiert. Es wurden Streifen von 4, 5, 6 und 8 mm Breite verwendet. Die freie Streifenlänge betrug 20 mm. Die Versuchsanordnung war derjenigen, wie sie Weber und Ischreyt verwendet hatten, ähnlich. Es wurde zunächst mit 250 g belastet, nach 5 Minuten die Längenänderung gemessen, dann mit 500 g belastet, und nach weiteren 5 Minuten wiederum die Längenänderung gemessen. Die Verlängerung war bei Auflage des ersten Gewichtes groß, bei Auflage des zweiten Gewichtes

geringer und langsam zunehmend, erst kurz vor dem Reißen des Streifens wurde sie wieder größer. Die Verlängerung war der Länge proportional und der Breite umgekehrt proportional. Die meridionalen Streifen erwiesen sich weniger widerstandsfähig als die äquatorialen. Streifen aus der Lederhaut jugendlicher Individuen zeigen eine höhere Bruchfestigkeit als solche Streifen alter Leute. Unter gleichen Bedingungen ist die Dehnung der Streifen aus jugendlichen Augen größer als bei Streifen aus Glaukomaugen und Augen älterer Leute. Er zieht daraus den Schluß, daß die stärkere Rigidität der Sklera im höheren Alter „mit Bezug auf die Pathogenese des Primärglaukoms von größter praktischer Bedeutung" sei.

Heymann (3) mißt die Bruchfestigkeit und Bruchdehnung von Skleralstreifen möglichst frischer Schweinsaugen. Er verwendet dazu einen Apparat, der zur Materialprüfung in der Textilindustrie dient und unter dem Namen „Festigkeitsprüfer Deforsenk" von der Firma Hugo Keyl in Dresden hergestellt wird. Zu experimentellen Untersuchungen am Tierauge — Zonula-Fasern und Linsenkapsel — wurde ein derartiger Apparat zum ersten Male von von Pflugk (10) benutzt; er verwendete den Deforden, der ein dem Deforsenk ähnlicher Apparat derselben Firma ist. Die Streifenlänge beträgt bei allen Versuchen Heymanns 15 mm, die Breite 1 mm. Die Meridionalstreifen junger Augen zeigen eine höhere Dehnbarkeit und Bruchfestigkeit als die alter Augen. Der hintere Bulbusabschnitt ist weniger widerstandsfähig als der vordere. Die Anfangsdehnung ist immer größer als die Dehnung bei stärkerer Belastung, erst kurz vor dem Reißen der Streifen nimmt dann die Dehnung wieder zu. Die Bruchdehnung schwankt zwischen 10 und 35%, die häufigst gefundenen Werte liegen dicht um 20% herum. Die nasale Bulbushälfte ist weniger widerstandsfähig als die temporale. Bei Versuchen mit zirkulären Streifen fand sich für die zirkulären Limbusstreifen die größte Bruchfestigkeit und die geringste Bruchdehnung, dann folgten die optikusnahen Zirkulärstreifen, während die Streifen aus der Aequatorgegend die geringste Bruchfestigkeit und die größte Bruchdehnung aufwiesen.

Sugomito (13) prüft die Bruchfestigkeit und Bruchdehnung von Skleralstreifen aus den Augen junger, erwachsener und lanolingefütterter Kaninchen. In einer früheren Mitteilung er-

wähnt er, daß der histologische Befund am Bulbus von Tieren, die mit Lanolin gefüttert wurden, in demselben Sinne Veränderungen aufweisen wie die Bulbi alter Tiere (12). Die größte Dehnbarkeit haben die Hornhautstreifen. Die Festigkeit an verschiedenen Stellen der äußeren Bulbushülle ist dem Alter der Tiere entsprechend verschieden. Sugomito glaubt, daß man durch weitere Versuche in dieser Richtung zu einem besseren Verständnis der Vorgänge bei der Bulbusruptur gelangen könne.

Erklärung der gebräuchlichen Fachausdrücke.

In dieser Literaturübersicht treten eine Reihe von Fachausdrücken aus der Elastizitätslehre auf. Der eine oder der andere Ausdruck wird auch später noch verwendet werden müssen. Es erscheint daher notwendig, eine kurze Zusammenstellung der in dieser Arbeit vorkommenden Begriffe zu geben. Ich halte mich dabei im wesentlichen an die Nomenklatur von Busemann-Föppl im Handbuch der Physik von Geiger und Scheel (1).

Die Dehnung ε ist die Verhältniszahl von der Längenänderung $\triangle 1$ zur ursprünglichen Länge 1.

$$\varepsilon = \frac{\triangle 1}{1}$$

Die Spannung σ ist die Verhältniszahl der in der Spannungsrichtung wirksamen Kräfte P zur Fläche des Querschnittes senkrecht zur Spannungsrichtung F.

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

Das Elastizitätsmodul E ist die Verhältniszahl von der Spannung σ zur Dehnung ε.

$$E = \frac{\varepsilon}{\sigma}$$

Für viele Stoffe, besonders für Metalle, ist das Elastizitätsmodul bis zu einer gewissen Belastung eine Konstante. Diese Belastungsgrenze wird als Proportionalitätsgrenze bezeichnet, weil bis zu dieser Belastung die Dehnung der Spannung proportional ist. Diese Proportionalität wird als Hooke'sches Gesetz bezeichnet.

Wie die Erfahrung lehrt, gilt es jedoch für viele Stoffe nicht. Das Elastizitätsmodul ist dann auch bei geringen Belastungen nicht konstant, sondern nimmt schon von den geringsten Belastungen an stetig ab oder zu. Schulze-Vollhardt (11), der diese Frage knapp aber übersichtlich behandelt, teilt mit, daß bei Gußeisen, Kupfer und Zement das Elastizitätsmodul bei wachsender Belastung stetig abnimmt, während es z. B. bei Leder und Hanfseilen ständig zunimmt. Nach übereinstimmenden Ergebnissen aller Autoren bei Dehnungsversuchen an Skleralstreifen nimmt hier mit wachsender Spannung die Dehnung immer langsamer zu, d. h. auch beim Skleralstreifen wird das Elastizitätsmodul mit wachsender Belastung größer. Für diese Abweichungen vom Hooke'schen Gesetz wurden die verschiedenen Formeln aufgestellt, deren z. B. Mehmke (9) eine ganze Reihe zusammenstellt, die aber für unsere Zwecke wenigstens zunächst nicht brauchbar sind, da ihre Anwendbarkeit auf den gerade zu untersuchenden Stoff immer rein empirisch durch das Experiment festgestellt wurde.

Bei den Dehnungsversuchen wird zwischen einer elastischen und einer plastischen Formveränderung gesprochen. Die elastische Formveränderung ist vollkommen reversibel, bei der plastischen Formveränderung bleibt auch nach Aufhören der einwirkenden Kräfte eine dauernde Formveränderung zurück. Bei fast allen Substanzen tritt unter der Einwirkung von Kräften gleichzeitig eine elastische und plastische Formveränderung auf. Für viele Stoffe ist indes die plastische Formveränderung bei geringer Belastung sehr klein. Diejenige Belastung, bei der sie dann merklich in Erscheinung tritt, wird als Elastizitätsgrenze bezeichnet.

Von der plastischen Formveränderung ist die elastische Nachwirkung zu unterscheiden. Die elastische Nachwirkung besteht darin, daß ein Körper zu einer Formveränderung Zeit benötigt. Bei der Untersuchung von Stoffen mit größerer elastischer Nachwirkung muß demnach die Geschwindigkeit, mit der die Versuche ausgeführt werden, einen großen Einfluß auf das Versuchsergebnis haben. Im allgemeinen folgt die elastische Nachwirkung einer Exponentialfunktion.

Die Querkontraktion ist die Verminderung des Querschnittes bei Belastung. Neben der Querkontraktion kann der untersuchte Stoff auch noch durch Aenderung seiner Dichte den

bei der Dehnung auftretenden Kräften auszuweichen suchen, und zwar durch eine Abnahme der Dichte. In welchem Verhältnis bei einer Dehnung Querkontraktion und Dichteänderung zueinander stehen, darüber gibt die Poisson'sche Zahl Auskunft. Die Poisson'sche Zahl m ist die Verhältniszahl zwischen Dehnung und Querkontraktion. Für die meisten Stoffe liegt m zwischen 2,5 und 4,0. Von Koster (8) wird für das Skleralgewebe m = 3 angenommen, jedoch wurden Messungen in dieser Hinsicht nie ausgeführt.

Die Bruchfestigkeit ist die Verhältniszahl aus der Kraft, die nötig ist, um den Bruch herbeizuführen und aus der Fläche des Querschnittes vor der Belastung in senkrechter Richtung zur Kraftrichtung.

Die Bruchdehnung ist die Verhältniszahl aus der Längenänderung bis zum Eintritt des Zerreißens und der Länge vor der Belastung.

Die Gleitgrenze ist diejenige Belastung, bei der ohne weitere Erhöhung der Belastung eine ständige Längenzunahme bis zum Zerreißen erfolgt.

Beschreibung der eigenen experimentellen Untersuchungen.

Beschreibung der Apparatur.

Zu meinen Versuchen habe ich den „Festigkeitsprüfer Deforsenk“ verwendet, der seinerzeit auf Veranlassung von Schmelzer auch von Heymann (3) benutzt wurde. Heymann hat damit die Bruchfestigkeit und Bruchdehnung bestimmt. Meine Aufgabe war es, vor allem die Dehnungsverhältnisse bei geringerer Belastung zu untersuchen und nach Möglichkeit das Elastizitätsmodul des Skleralgewebes zu bestimmen. An dem Apparat ist ein Tintenschreiber angebracht, der die Belastungs-Dehnungsdiagramme automatisch registriert. Die aufgenommenen Kurven sind aber, wie schon Heymann mitteilt, viel zu klein, als daß man daraus mehr entnehmen könnte als die Beobachtung, daß das Elastizitätsmodul mit wachsender Belastung dauernd zunimmt und erst kurz vor dem Zerreißen wieder abnimmt. Es war daher nötig, für meine Versuche den Apparat dahin abzuändern, daß auch kleine Längenänderungen deutlich in Erscheinung treten. Nach mannigfachen Ueberlegungen und Versuchen erschien es noch am praktischsten, zu diesem Zwecke einen Lichtzeiger zu verwenden. Damit mußte dann allerdings auf die Bequemlichkeit einer selbsttätigen Registrierung der Versuchsergebnisse durch den Tintenschreiber verzichtet werden.

Beim Festigkeitsprüfer Deforsenk wird der zu prüfende Gewebsstreifen zwischen zwei Klammern eingespannt. Die eine dieser Klammern ist fest am Stativ angebracht, die andere Klammer ist beweglich und kann der Einwirkung von Zugkräften ausgesetzt werden. Die Kraftübertragung auf diese Klammer erfolgt durch ein System, das im Prinzip eine gleicharmige Hebelwaage ist. An der einen Seite des Waagbalkens ist die bewegliche Klammer befestigt, in die das zu prüfende Gewebe eingespannt wird, auf der anderen Seite des Waagbalkens hängt das Gefäß, das zur Aufnahme von Gewichten dient. Bringt man

in das Gefäß ein Gewicht, so wird auf der anderen Seite der Waage auf die bewegliche Klammer eine Zugkraft ausgeübt, die gleich dem Gewicht ist. Die Richtung dieser Zugkraft ist bei dieser Versuchsanordnung senkrecht von unten nach oben. Die zweite Klammer ist senkrecht unter der ersten fest am Stativ angebracht und zu dem Zwecke, um verschieden lange Einspannlängen zur Verfügung zu haben, nach Lösung einer Klemmschraube in senkrechter Richtung am Stativ verschieblich. Während der Durchführung eines Belastungsversuches bleibt selbstverständlich die Stellung dieser Klammer immer die gleiche, ja sie wurde bei den folgenden Versuchen über ganze Versuchsreihen weg nicht geändert, um dauernd möglichst gleiche Bedingungen zu haben.

Bei einer gewöhnlichen Hebelwaage würde sich nun durch eine Drehung des Waagbalkens die Zugrichtung ändern, weil dann die untere Klammer nicht mehr genau senkrecht unter dem Ende des Waagbalkens läge. Dieser Umstand wird beim Festigkeitsprüfer Deforsenk dadurch vermieden, daß an beiden Enden des Waagbalkens je ein Radsegment befestigt ist. Der Mittelpunkt der beiden Radsegmente fällt mit dem Drehpunkt des Waagbalkens zusammen. Die bewegliche Klammer und auf der anderen Seite des Waagbalkens das Gefäß für die Gewichte sind an diesen Radsegmenten mittels dünner Metallbänder so befestigt, daß sich die Metallbänder bei einer Drehung des Waagbalkens auf den Radsegmenten auf- bzw. abwickeln und die Klammer und das Gefäß sich nur in senkrechter Richtung bewegen können.

Am Waagbalken ist ein Tara angebracht, das so eingestellt werden muß, daß sich die Stellung des Waagbalkens bei unbelasteter Waage nach Lösung der Arretierung nicht ändert.

Als Gewicht zur Belastung wird beim Festigkeitsprüfer Deforsenk Wasser verwendet. Das Gefäß, das an der einen Seite des Waagbalkens hängt und zur Aufnahme des Wassers dient, hat im Boden ein Loch, das durch einen Ventilstab verschlossen werden kann. Löst man die Arretierung der Waage, so wird, bevor die Waage frei wird, dieses Loch durch den Ventilstab verschlossen. Arretiert man dann nach einem Dehnungsversuch die Waage wieder, so wird gleichzeitig durch einen Greifer der Ventilstab gehoben, so daß das Wasser in ein darunter gestelltes Gefäß abfließt.

In das Waagegefäß fließt das Wasser aus einem Ueberlaufgefäß. Aus dem Ueberlaufgefäß wird es durch einen Senkkörper verdrängt. Dieser Senkkörper hängt an einem Halteseil, das mittels einer Kurbel, die eine Schraubenspindel in Bewegung setzt, auf- und abgerollt werden kann. Dem Apparat sind vier verschiedene, auswechselbare Senkkörper und zu jedem Senkkörper ein passendes Ueberlaufgefäß beigegeben. Dadurch stehen folgende Meßbereiche zur Verfügung: 0—5 g, 0—25 g, 0 –250 g und schließlich 0—500 g. Bei den später beschriebenen Messungen wurde jedoch ausschließlich der Senkkörper verwendet, der eine Belastung von 0—25 g ermöglichte. Die Schraubenspindel hat 100 Windungen. Durch 100 Kurbelumdrehungen wird der Senkkörper so weit in das Ueberlaufgefäß gesenkt, daß er 25 g Wasser daraus verdrängt. Durch eine Umdrehung werden also 0,25 g verdrängt. An der Schraubenspindel ist ein Maßstab angebracht, an dem abgelesen werden kann, wieviel Kurbelumdrehungen gemacht wurden. Das zur Belastung verwendete Wasser wurde mit Nekal behandelt. Nekal ist eine Substanz, die die Oberflächenspannung des Wassers erheblich herabsetzt. Das Wasser haftet deshalb weniger an den Wänden der Gefäße, und man erzielt so eine größere Genauigkeit. Vor jedem Versuch wird durch Drehen der Kurbel der Maßstab, der die Belastung anzeigt, auf die Nullmarke eingestellt und dann das Ueberlaufgefäß aus einer Vorratsflasche gefüllt.

Der Tintenschreiber ist am Gestänge des Belastungsgefäßes befestigt und macht also alle Ausschläge der Waage mit. Die Schreibfläche wird durch die Schraubenspindel, die zur Bewegung des Senkkörpers dient, beim Drehen an der Kurbel gleichförmig in horizontaler Richtung bewegt. Dadurch wird eine selbsttätige Registrierung des Dehnungsvorganges erreicht, und zwar wird die Größe der Belastung in waagrechter, die Größe der Dehnung in senkrechter Richtung aufgeschrieben. Die Schreibfeder wird durch eine Gleitschiene gegen die Schreibfläche gepreßt. Am Apparat ist ferner noch eine Luftbremse angebracht, die Erschütterungen der Apparatur beim Zerreißen des zu untersuchenden Gewebes vermeidet. Nebenbei sei noch erwähnt, daß der Festigkeitsprüfer nicht nur als gleicharmige, sondern auch als ungleicharmige Hebelwaage mit einem Uebersetzungsverhältnis 1:4 verwendet werden kann, doch wurde in den folgenden Versuchen von dieser Möglichkeit kein Gebrauch gemacht. Heymann hat nach von Pflugk an der unteren Klammer, die

zum Einspannen des Gewebes dient, einen verschiebbaren Glaszylinder angebracht, dieser wurde mit physiologischer Kochsalzlösung gefüllt und, nachdem die Gewebsstreifen eingespannt waren, hochgeschoben, so daß das zu untersuchende Gewebe während des Versuches von der physiologischen Kochsalzlösung umspült wurde. Dadurch wurde ein Austrocknen des Gewebes während des Versuches verhindert.

An der beschriebenen Apparatur habe ich nun noch einen Lichtzeiger angebracht, um auch kleine Ausschläge messen zu können. Zu diesem Zwecke wurde an dem Radsegment auf der Seite der Waage, auf der sich die beiden Klammern zum Einspannen des Gewebes befinden, ein kleiner Hohlspiegel mit einem Durchmesser von 22 mm und einer Brennweite von ca. 30 cm befestigt. An symmetrischer Stelle am anderen Radsegment wurde dann ein kleines Metallgewicht befestigt, das so gewählt war, daß die Waage wieder möglichst genau im Gleichgewicht war. Die letzte Ungenauigkeit wurde dann noch durch das Tara ausgeglichen. In ungefähr 30 cm Entfernung von dem Hohlspiegel wurde eine starke Lichtquelle angebracht. Diese Lichtquelle war an einem Wandarm befestigt, der mehrere Gelenke enthält und so eine freie Beweglichkeit der Lichtquelle nach allen Richtungen hin und in einem beträchtlich großen Raume gestattete. Als Lichtquelle diente eine 100-Watt-Lampe, die bis auf ein kleines 26 × 16 mm großes, mit mattiertem Glas bedecktes Fenster durch ein Metallgehäuse vollkommen abgeschirmt war. Vor diesem Mattglas war in horizontaler Richtung ein 0,11 mm starker Metalldraht gespannt. Dieser Metalldraht wurde mittels des Hohlspiegels auf eine von der Apparatur ca. 4,5 m entfernte Wand abgebildet. An dieser Wand wurde in senkrechter Richtung eine 1 m lange Meßlatte, die eine Millimetereinteilung trug, befestigt. Die Gelenke des Wandarmes erlaubten nun die Lichtquelle so lange zu verschieben, bis die Abbildung des Drahtes auf der Meßlatte die größtmögliche Schärfe erreicht hatte. Die Schärfe der Abbildung war so, daß man Millimeter noch genau ablesen und halbe Millimeter schätzen konnte. Durch den Lichtzeiger wird der Ausschlag des Waagbalkens ca. 80 mal vergrößert.

Eichung der Apparatur.

Zur Eichung der Apparatur, d. h. zur Bestimmung der Längenänderung des zu prüfenden Gewebes, die dem auf der Meßlatte abgelesenen Lichtzeigerausschlag entspricht, sind zwei Möglich-

keiten vorhanden: Erstens kann man rein rechnerisch feststellen, um wieviel sich bei einem gewissen Ausschlag des Lichtzeigers die bewegliche Klammer hebt oder senkt. Zweitens kann man rein experimentell vorgehen, indem man die zu einem gewissen Lichtzeigerausschlag zugehörige Aenderung des Abstandes der beiden Einspannklammern möglichst genau zu messen sucht. Ich habe diese beiden Möglichkeiten ausgenutzt und dadurch eine gewisse Kontrolle für die Richtigkeit der gefundenen Werte gehabt. Zunächst habe ich mittels trigonometrischer Beziehungen die Lichtzeigerausschläge berechnet, die einer Längenänderung von 1, 2, 3 usw. bis 11 mm entsprechen. Auf eine Wiedergabe der zu dieser Berechnung verwendeten Gleichungen und der Berechnung selbst an dieser Stelle*) verzichte ich, da die Ableitung der trigonometrischen Gleichung, die die Beziehung zwischen Lichtzeigerausschlag und Aenderung des Klammerabstandes herstellt, sehr umfangreich ist. Infolgedessen würde eine Wiedergabe des Eichungsprotokolls erheblich Platz beanspruchen. Es sei hier nur erwähnt, daß zum Zwecke der rechnerischen Eichung an der Apparatur eine Reihe von Längenmessungen ausgeführt wurden. Die gefundenen Werte wurden in die oben erwähnte Gleichung eingesetzt. Dann wurde unter Zuhilfenahme einer fünfstelligen Logarithmentafel die Gleichung für die elf oben erwähnten Einzelfälle durchgerechnet. Schon nach wenigen Versuchen zeigte sich, daß der errechnete Bereich viel zu groß war, es hätte genügt, die Rechnung bis zu einer Längenänderung von 6 mm durchzuführen. Um nun diese Berechnung auf ihre Richtigkeit zu prüfen, habe ich mit dem Tintenschreiber eine Kurve geschrieben und gleichzeitig die zugehörigen Werte der Ausschläge des Lichtzeigers abgelesen. Die Kurve wurde zunächst unter einem Mikroskop mittels eines Okularmikrometers ausgemessen. Da die Abstände, die gemessen werden mußten, oft so groß waren, daß man das zu messende Objekt über mehrere Gesichtsfelder hinweg verschieben mußte, war die erreichbare Genauigkeit nur gering. Innerhalb der erreichten Genauigkeit fand sich gute Uebereinstimmung der errechneten und der experimentell gefundenen Werte. Nach Abschluß der Versuche wurden daher diese Kurven nochmals mittels eines Zeiß'schen Komparators, d. i. ein Instrument zu besonders genauen Längenmessungen, ausgemessen. Da die Breite des Tintenstriches ungefähr 0,4 mm ist und die Striche

*) Das Eichungsprotokoll habe ich zusammen mit den Kurven im Labor der Univ. Augenklinik, Erlangen hinterlegt.

bei der Vergrößerung unter dem Mikroskop ziemlich unregelmäßig erscheinen, vor allem in ihrer Breite nicht unerheblich schwanken, blieb die erreichte Genauigkeit weit hinter der, die mit einem Komparator erreichbar wäre, zurück. Die erreichte Genauigkeit dürfte um $\pm$ $^5/_{100}$ mm liegen. Innerhalb dieser Grenzen fand sich eine noch genügende Uebereinstimmung der Werte.

Bei der Bestimmung der Ausmaße der Versuchsanordnung für die obige Berechnung stand der Lichtzeiger auf der Meßlatte bei arretierter Waage bei der Marke 98,5. Es zeigte sich nun, daß der Lichtzeiger bei Beobachtung über längere Zeiträume kleine Schwankungen machte, ohne daß der Grund dafür gefunden werden konnte. Wahrscheinlich handelte es sich um Einwirkungen von Temperaturschwankungen und ähnlichem. Ich habe mich daher entschlossen, an der Versuchsanordnung so lange nichts zu ändern, als diese Schwankungen $\pm$ 5 mm auf der Meßlatte nicht überschritten. Tatsächlich war ich während der ganzen Zeit, in der ich die Dehnungsversuche durchführte, nur zweimal genötigt, einzugreifen. Beide Male wurde die Höhe der Lichtquelle gering verändert und so der Lichtzeiger wieder in den gewünschten Bereich zwischen die Marken 98,0 und 99,0 der Meßlatte gebracht. Anschließend habe ich den Abstand der Lichtquelle vom Boden gemessen, zu welchem Zwecke ich einen Faden von genau passender Länge verwendete. Eine meßbare Veränderung dieses Abstandes habe ich dabei nie gefunden. Anschließend nahm ich dann eine experimentelle Nacheichung vor. Innerhalb der erreichbaren Genauigkeit fand sich immer genügende Uebereinstimmung mit den ursprünglich errechneten Werten.

Um nun für jeden auf der Meßlatte abgelesenen Wert gleich die zugehörige Aenderung des Klammerabstandes zu haben, wurde durch Interpolation aus den errechneten Werten für jeden Millimeter der Meßlatte zwischen den Marken 98,5 und 50,0 cm die zugehörige Längenänderung berechnet. Dies war ohne weiteres möglich, da die Eichkurve aus diesen 6 errechneten Werten kaum von einer geraden Linie abwich. Es war nun möglich, in dem genannten Meßbereich für jeden Millimeter der Meßlatte den zugehörigen Wert der Aenderung des Klammerabstandes aus einer Tabelle abzulesen, die halben Millimeter durch Interpolation zu errechnen. Diese Tabelle hatte aber nur dann Gültigkeit, wenn der Lichtzeiger bei arretierter Waage auf der Marke 98,5

stand. Die Tabelle war so angelegt, daß jeweils die Lichtzeigerausschläge und die Längenänderungen des Klammerabstandes in senkrechten Kolonnen untereinander standen. Die zusammengehörigen Werte der Lichtzeigerausschläge und der Längenänderungen standen in waagrechter Richtung nebeneinander. Um die Tabelle nun auch dann verwenden zu können, wenn der Lichtzeiger bei arretierter Waage nicht gerade auf 98,5 stand, sondern um die noch gestatteten ± 5 mm von dieser Mittellage abwich, wurde die Tabelle folgendermaßen erweitert: Die senkrechten Kolonnen, die die Werte der Längenänderung enthielten, wurden aus der Tabelle herausgeschnitten. Es entstand so ein Papiergitter, das in senkrechten Kolonnen die Werte der Lichtzeigerausschläge enthielt. Dieses Gitter wurde auf ein Blatt Papier gelegt und die Tabelle wieder genau so angelegt, wie sie vor dem Ausschneiden der Werte der Längenänderung war. Es bestand jetzt lediglich der Unterschied, daß die Kolonnen auf zwei verschiedenen Blättern standen. Das obere Blatt konnte nun gegen das untere in senkrechter Richtung verschoben werden. Entsprechend den erlaubten ± 5 mm mußte es um 5 Spalten nach oben und unten verschieblich sein. Die Kolonnen auf dem unteren Blatt wurden dahin ergänzt, daß auch bei diesen extremsten Verschiebungen keine leeren Stellen in der Tabelle vorhanden waren. Stand nun der Lichtzeiger z. B. bei 98,7 statt bei 98,5, so wurde das obere Blatt der Tabelle gegen das untere um 2 Spalten nach unten verschoben, und man konnte jetzt auch für diese Stellung des Lichtzeigers sich entsprechende Werte sofort aus der Tabelle entnehmen.

Es ist natürlich klar, daß diese Verschiebung der Tabellenkolonnen gegeneinander eine gewisse Ungenauigkeit mit sich bringt. Wie aber eine einfache Ueberschlagsrechnung zeigt, ist der gemachte Fehler sehr klein gegenüber der bei der Messung erreichten Genauigkeit. Dieser Fehler kann daher die Versuchsergebnisse in keiner Weise fälschen, ja nicht einmal merklich beeinflussen. Ohne diese Vereinfachung würde aber die Rechnerei ins Uferlose gehen.

Noch aus einem weiteren Grund kann der hier gemachte Fehler keinen Einfluß auf das Versuchsergebnis haben. Die Versuchsanordnung gestattet nämlich nicht, die absolute Länge der Gewebsstreifen mit derselben Genauigkeit zu messen, mit der man die Längenänderung der Gewebsstreifen messen kann.

Die Meßgenauigkeit für die Längenänderung beträgt ungefähr $+ \frac{1}{100}$ mm. Die Meßgenauigkeit für den Klammerabstand bei arretierter Waage ist aber bei Zuhilfenahme einer Schublehre mit $\pm \frac{1}{10}$ mm schon hoch angegeben. In diese Größenordnung fällt nun auch der Fehler, den man machen würde, wenn man die Abweichung des Lichtzeigers von $\pm$ 5 mm von der Mittellage 98,5 überhaupt vollkommen unberücksichtigt ließe. Durch die Korrektur mittels der verschieblichen Tabelle wird also die Abweichung des Lichtzeigers von der Mittellage in jeder Hinsicht genügend ausgeglichen.

Die wesentlich ungenauere Meßbarkeit der absoluten Länge der Gewebestreifen gegenüber der Messung der Längenänderung ist übrigens gar nicht so schlimm, wie es auf den ersten Blick aussieht. Was uns interessiert, ist ja die Dehnung, d. h. der Quotient aus Längenänderung und ursprünglicher Länge. Ist die Meßgenauigkeit für die Gesamtlänge 10 mal geringer als die Meßgenauigkeit für die Längenänderung, so hat dies für die Berechnung der Dehnung keinen wesentlichen Einfluß, sobald die Länge des Streifens mindestens 10 mal so groß ist als die Längenänderung. Ferner kann man den Mangel der ungenauen Meßbarkeit der Streifenlänge noch dadurch ausgleichen, daß man den an und für sich nicht genau meßbaren Klammerabstand über ganze Versuchsreihen hinweg konstant hält, was ja ohne weiteres möglich ist.

Beschreibung des Ganges der Versuche.

Wie Heymann mußte ich bei meinen Versuchen in der Hauptsache tierisches Material verwenden, das mir dank des Entgegenkommens der Direktion des Erlanger Schlachthofes in ausreichendem Maße zur Verfügung stand. Außerdem konnte ich noch in beschränktem Umfange menschliches, operativ gewonnenes Material, sowie einige Leichenaugen untersuchen. Bei den Versuchen mit Tieraugen beschränkte ich mich wie Heymann auf die Untersuchung von Schweinsaugen. Es kamen fast ausschließlich Augen von Tieren im Alter von einem halben bis dreiviertel Jahr zur Untersuchung, da ältere Tiere im hiesigen Schlachthof nur äußerst selten geschlachtet werden. Die Schweinsaugen wurden in meiner Gegenwart unmittelbar nach der Schlachtung unter der Mitnahme von möglichst viel Muskel- und Fettgewebe enukleiert.

Da sich bei den Dehnungsversuchen herausstellte, daß die Elastizitätsverhältnisse schon durch geringe vorherige Belastung stark verändert werden, wurde streng darauf gesehen, daß die Augen mit größter Vorsicht entfernt wurden. Bei der Entfernung anscheinend stärker gepreßte Augen wurden von vornherein ausgeschieden. Ebenso wurde darauf geachtet, daß die Augen sofort nach der Schlachtung, nachdem die Schweine erst eben ausgeblutet waren, entfernt wurden und nicht erst, wie es sonst üblich ist, nachdem die Schweine in einem Kessel mit heißem Wasser abgebrüht waren. Nach der Entfernung aus der Orbita wurden die Augen in ein Glaßgefäß verpackt, in dem einige Lagen Filtrierpapier waren, die mit physiologischer Kochsalzlösung getränkt waren. Ich fuhr dann sofort zum Untersuchungsraum in der Universitäts-Augenklinik, Erlangen, so daß bereits ca. 10 Minuten nach der Schlachtung des Schweines mit der Präparation des ersten zu untersuchenden Auges begonnen wurde. Die weiteren noch am gleichen Tage zu untersuchenden Augen wurden in der Zwischenzeit vor das Fenster gestellt. Dies erschien mir zur Frischerhaltung genügend, da die Versuche im Winter (1936/37) durchgeführt wurden und mit der Verarbeitung des zweiten Auges etwa ein bis eineinhalb Stunden nach der Schlachtung begonnen wurde.

Zunächst wurde an Hand der Form des Auges, der Lage der Augenmuskeln und der Richtung und Lage des Sehnerveneintrittes festgestellt, ob es sich um ein rechtes oder linkes Auge handle. Dann wurde mittels Schere und Pinzette Muskulatur, Fett- und Bindegewebe einschließlich der T e n o n'schen Kapsel vorsichtig und sorgfältig entfernt. Zur Verhütung der Austrocknung wurde während dieser Skelettierung des Bulbus das ganze Auge wiederholt in physiologische Kochsalzlösung getaucht. Dann wurde der horizontale, vertikale und sagittale Durchmesser des Bulbus mittels einer Schublehre gemessen. Diese Messung wurde vor allem deshalb durchgeführt, weil eine genaue Altersangabe für die Schweine nicht zu erhalten war. Mit zunehmendem Alter der Schweine nimmt aber die Bulbusgröße zu, da Schweine in einem Alter von 1 Jahr noch keineswegs ausgewachsen sind. Der Bulbus wurde sodann mittels einer Rasierklinge, die auf einem Korken befestigt war, durch einen Schnitt in horizontaler Richtung in eine obere und eine untere Hälfte geteilt. Glaskörper, Netz- und Aderhaut wurden mittels Pinzette vorsichtig entfernt, nur soweit nötig wurde noch eine feine Schere zu Hilfe ge-

nommen. Die beiden Bulbushälften wurden dann, je nachdem, ob Streifen in meridionaler oder äquatorialer Richtung gewünscht wurden, weiter zerteilt. Mittels eines aus zwei Rasierklingen hergestellten Doppelmessers mit einem konstanten Schneidenabstand von 1 mm, nach von Pflugk (10), wurden aus den Skleralstücken 1 mm breite Streifen ausgeschnitten. Bei den meisten früheren Arbeiten waren breitere Streifen in Anwendung gekommen. Dies erschien mir ebenso wie Heymann nicht angängig, da es sich bei dem Skleralgewebe ja um kein ebenes Gebilde handelt, sondern die Streifen Ausschnitte aus einer Hohlkugel darstellen. Bei breiteren Streifen würden also die Randpartien bei Dehnungsversuchen wesentlich stärker belastet werden als die Streifenmitte. Auch dürften die günstigsten Verhältnisse wohl dadurch entstehen, daß man die Streifenbreite in der gleichen Größenordnung hält, wie sie der Dicke des Skleralgewebes zukommt. Bei dem Schneiden der Streifen wurde so schonend wie möglich vorgegangen. Anschließend wurden die Streifen mit einer Lupe betrachtet. Vor allem wurde darauf gesehen, daß nicht der Eintritt einer Vortexvene auf den Streifen zu liegen kam. Streifen, die bei der Kontrolle Unregelmäßigkeiten aufwiesen, wurden ausgeschieden. Die Rasierklingen des Doppelmessers wurden zum Ausschneiden von 8 bis 10 Streifen verwendet und dann ausgewechselt. Besonders große Unregelmäßigkeiten traten dann auf, wenn das Gewebsstück, aus dem die Streifen ausgeschnitten wurden, beim Schneiden nicht in seiner ganzen Fläche faltenlos der Unterlage auflag. Das Gewebe wurde daher schon vor dem Ausschneiden der 1 mm breiten Streifen mittels einer Schere in ca. 3 mm breite Streifen geschnitten, die sich der Unterlage besser als größere Gewebsstücke anpaßten. Es zeigte sich, daß auch die Konsistenz der Unterlage keineswegs gleichgültig für die Güte des Schnittes ist. Anfangs versuchte ich Kork als Schneideunterlage zu verwenden. Es ergaben sich dabei aber viele unbrauchbare Schnitte, anscheinend vor allem deshalb, weil die Konsistenz der Unterlage von Stelle zu Stelle wechselte. Der Versuch auf Glas zu schneiden mißlang vollkommen. Dagegen erwies sich Stearin als vorzügliche Unterlage. Ich verwendete Stearinkerzen, die einen Durchmesser von ca. 24 mm hatten. Die schon einigermaßen in Form geschnittenen Gewebsstücke paßten sich dieser Krümmung sehr gut an. Bis zur weiteren Verwendung wurden die fertigen Streifen dann in physiologischer Kochsalzlösung aufbewahrt.

Nun wurde der Festigkeitsprüfer gebrauchsfertig gemacht. Die Schreibfeder wurde während aller Belastungsversuche hochgeklappt und die Gleitschiene, die die Feder gegen die Schreibfläche preßt, vollkommen entfernt. Beides geschah, um das Auftreten von Reibungskräften an Schreibfläche und Gleitschiene zu vermeiden. Lediglich für die Nacheichungen wurde die Belastungsschiene wieder angebracht und die Schreibvorrichtung in Gang gesetzt. Da mit der beschriebenen Apparatur eine Längenmessung bei unbelasteten Gewebsstreifen unmöglich ist, wurde das Tara so eingestellt, daß sofort nach Aufhebung der Arretierung auf den Streifen eine Zugkraft von 1 g einwirkt. Zu diesem Zwecke wurde an der beweglichen Klammer ein Gewicht von 1 g befestigt und die Waage jetzt austariert, selbstverständlich ohne daß ein Streifen eingespannt war. Nach der Austarierung wurde das Gewicht wieder entfernt. Um eine Schädigung der Streifen während des Einklemmens zu vermeiden, gleichzeitig um ein Herausrutschen der Streifen aus den Klammern zu verhindern, verwendete ich die von Heymann beschriebenen Filtrierpapierrähmchen nach von Pflugk (10), die nach dem Einklemmen durchschnitten wurden. Der Versuchsraum wurde jetzt vollkommen abgedunkelt, lediglich die Lichtquelle für den Lichtzeiger brannte. Die Meßlatte wurde dadurch hinreichend beleuchtet, alles andere war vollkommen im Dunkeln. Die Arretierung der Waage wurde nun gelöst. Diese Aufhebung der Arretierung mußte langsam erfolgen, da sonst der Streifen elastische Schwingungen in seiner Längsrichtung ausführte. Da die bewegliche Klammer und die Ausgleichsgewichte, die an der Waage angebracht sind, ein verhältnismäßig beträchtliches Gewicht darstellen, traten besonders beim Durchschneiden der Rähmchen gerne Torsionsschwingungen auf, die vor Lösung der Arretierung erst abgebremst wurden. Da zu erwarten war, daß die Dehnungsverhältnisse des Skleralgewebes von der Belastungszeit abhängig sind, wurde bei allen Versuchen, falls später nichts anderes erwähnt wird, nach der Belastung 2 Minuten bis zur Ablesung des Lichtzeigerausschlages gewartet. 2 Minuten nach Aufhebung der Arretierung wurde also der Lichtzeigerausschlag abgelesen. Die Summe aus dem Abstand der Einspannklammern und aus der dem abgelesenen Lichtzeigerausschlag entsprechenden Längenänderung ergibt dann den Ausgangswert, nämlich die Länge des Streifens bei einer Belastung mit 1 g.

Für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls ist die Kenntnis des Flächenquerschnittes der untersuchten Gewebsstreifen notwendig.

Nun ist die Breite bei unseren Versuchen immer 1 mm. Die Dicke der Streifen dagegen ist ganz verschieden, da es nicht möglich ist, Streifen gleicher Dicke aus dem Skleralgewebe herzustellen. Es wurde daher die Dicke der Skleralstreifen über die ganze Streifenlänge hin im Abstand von 0,2 zu 0,2 cm mittels eines Okularmikrometers gemessen. Zu diesem Zwecke wurden die Streifen nach Beendigung des Dehnungsversuches auf eine Glasplatte mit eingeritzter Millimetereinteilung gelegt und unter einem Mikroskop mit Okularmikrometer ausgemessen. Es ergab sich, daß die Streifendicke sehr großen Schwankungen unterworfen war. Am dünnsten ist die Sklera in der Gegend unmittelbar vor dem Aequator. Die größte Dicke findet sich in den hinteren Abschnitten des Bulbus. Die Dicke in Limbusnähe steht zwischen der der Aequatorgegend und des hinteren Bulbusabschnittes. Danach ist zu erwarten, daß Meridionalstreifen über ihre Länge hin stärkere Schwankungen der Dicke aufweisen als zirkuläre Streifen. In der Tat fanden sich auch bei den meridionalen Streifen erhebliche Schwankungen, und im Durchschnitt war die dickste Stelle dieser Streifen ungefähr doppelt so dick als die dünnste. Bei den Streifen mit den größten Schwankungen wurde an der schwächsten Stelle eine Dicke von 0,36 mm, an der stärksten eine solche von 1,0 mm gefunden, bei einem anderen Streifen an der schwächsten Stelle 0,48 mm, an der stärksten 1,46 mm. Die am häufigst gemessenen Werte der Streifendicke lagen ziemlich dicht um 1,0 mm. Ich war mir klar darüber, daß diese Methode der Streifenmessung nur eine beschränkte Genauigkeit haben kann. Jedoch erwies sich diese Methode nach einer Reihe von Versuchen, die Streifendicke auf anderem Wege zu messen, immer noch am einfachsten und für diese Zwecke von ausreichender Genauigkeit. Die starken Schwankungen in der Streifendicke mußte ich in Kauf nehmen, denn hätte ich nur Streifen verwendet, deren Dicke als praktisch konstant hätte angesehen werden können, so wären nur kurze Einspannlängen zur Verfügung gestanden. Rechnerisch die Auswirkung der Schwankungen der Streifendicke auf die Dehnung zu erfassen ist unmöglich, da zu diesem Zwecke bekannt sein müßte, ob und wie sich das Elastizitätsmodul des Skleralgewebes mit Aenderung der Dicke des Gewebes ändert.

Da für das Glaukomproblem in der Hauptsache die Dehnungsverhältnisse des Skleralgewebes bei der Belastung interessieren, die den in einem Auge möglichen Innendrucken entsprechen,

ist es nötig zu wissen, welche Belastung des Streifens dem normalerweise im Auge vorkommenden Drucke entspricht. Die im folgenden angegebene Ueberschlagsrechnung folgt in ihrem Gedankengange einer Berechnung Kosters (8). Es wird angenommen, das Auge sei eine Hohlkugel vom Radius r, in der ein Innendruck p herrsche. Durch eine Schnittfläche, die durch den Mittelpunkt der Kugel geht, denke ich mir die Kugel in 2 gleiche Hälften geteilt. Der Innendruck sucht nun diese beiden Hälften auseinanderzudrängen, und zwar mit einer Kraft P. Diese Kraft ist gleich dem Produkt aus dem Innendruck p und der Fläche F der Schnittebene.

$$P = p \cdot F$$

Diese Gleichung ist einfach die Umkehrung der Gleichung:

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$$

Die Fläche der Schnittebene F ist gleich $r^2 \pi$.

Also

$$P = p \cdot r^2 \pi$$

Die Verhältnisse sind nun genau dieselben, als wenn auf einen Hohlzylinder vom Radius r in Richtung seiner Achse eine gleichmäßig über den ganzen Umfang des Zylinders verteilte Zugkraft P einwirken würde. Aus diesem Zylinder wird nun ein Streifen der Breite a, dessen Längsrichtung mit der Richtung der Zugkraft zusammenfällt, herausgenommen. Die auf diesen Streifen einwirkende Zugkraft Σ steht zu der gesamten Zugkraft P im selben Verhältnis wie die Streifenbreite a zum Umfang des Zylinders $2r\pi$.

$$\frac{\Sigma}{P} = \frac{a}{2r\pi} \qquad \Sigma = \frac{a \cdot P}{2r\pi}$$

Kehren wir nun zu unserer Kugel zurück, so ergibt sich

$$\Sigma = \frac{a \cdot p \cdot r^2 \pi}{2r\pi} = \frac{a \cdot p \cdot r}{2}$$

Für unsere Schweinsaugen ist der mittlere Radius r ungefähr 1,27 cm. Die Streifenbreite a ist bei meinen Versuchen stets 0,1 cm. Die Berechnung werde nun für einen intraokularen Druck von 30 mm Quecksilber, also die obere Grenze des normalen Druckes, durchgeführt: Zunächst muß der Druck der 30 mm

hohen Quecksilbersäule in $\frac{gr}{cm^2}$ ausgedrückt werden. Da das spezifische Gewicht des Quecksilbers 13,6 ist, so ergibt die Umrechnung einen Druck von

$$\frac{30 \cdot 13{,}6}{10} = 40{,}8 \frac{gr}{cm^2}$$

Nun werden diese Werte in die Gleichung für Σ eingesetzt, und es ergibt sich

$$\Sigma = \frac{0{,}1 \cdot 40{,}8 \cdot 1{,}27}{2} = 2{,}7 \text{ gr}$$

Ein intraokularer Druck von 30 mm Quecksilber entspricht also unter den obigen Bedingungen der Belastung eines 1 mm breiten Skleralstreifens mit 2,7 g. Diese Berechnung ist natürlich keine exakte, sondern lediglich eine grobe Ueberschlagsrechnung, denn das Auge weicht beträchtlich von der angenommenen Kugelgestalt ab, und außerdem ist bei der wechselnden Dicke der Sklera auch nicht zu erwarten, daß die Spannung in der gedachten Schnittebene über den ganzen Kreisumfang weg gleichmäßig verteilt sei.

Versuchsergebnisse.

Abgesehen von den Vorversuchen kamen 72 Augen zur Untersuchung. Die Augen Nr. 1 bis 64 waren Schweinsaugen, die Augen Nr. 65 bis 72 waren menschliche Augen. Die Augen Nr. 1, 2 und 9 habe ich nachträglich noch ausgeschieden, da ich mit ihnen eine Meßreihe beginnen wollte, deren Ausführung dann unterblieb. Es blieben also im ganzen 69 Augen. Die oben beschriebene Dickenmessung der Skleralstreifen wurde nur für die Augen Nr. 26 bis 72 durchgeführt.

Bei den Schweinsaugen handelte es sich fast durchwegs um Augen von Tieren im Alter von ½ bis ¾ Jahr, lediglich die Augen Nr. 3, 20, 21, 28, 29, 42, 44, 45, 61, 62 stammten von Tieren im Alter von 1 Jahr, die Augen Nr. 7 und 8 von einem Tier im Alter von 2 Jahren. Bei den Augen Nr. 7 und 8, 10 und 11, 20 und 21, 28 und 29, 33 und 34, 38 und 39, 44 und 45, 61 und 62 handelte es sich jeweils um Paaraugen von demselben Tier. Die Augen Nr. 18 und 37 kamen erst einen Tag nach der Schlachtung zur Untersuchung, das Auge Nr. 19 erst nach zwei Tagen. Der Ab-

stand der beiden Einspannklammern betrug bei den Untersuchungen an Auge Nr. 56 5 mm
Auge Nr. 57—64 10 mm
Auge Nr. 3— 8, 10—49 15 mm
Auge Nr. 50—55 20 mm

Bei den Augen Nr. 3—8, 10—31, 33—49 und 62 kamen Meridionalstreifen zur Untersuchung. Aus jedem dieser Augen wurden 4 Streifen untersucht, und zwar wurde je ein Streifen aus der Mitte des oberen nasalen, oberen temporalen, unteren nasalen und unteren temporalen Quadranten entnommen. Bei dem Auge Nr. 56 kamen ebenfalls diese Meridionalstreifen zur Untersuchung, jedoch wurden sie vor dem Dehnungsversuch in der Mitte durchgeschnitten. Es entstanden so 8 Streifen von nur halber Länge, und es konnte der Teil des Streifens, der der vorderen Bulbushälfte angehörte, getrennt von dem, der der hinteren Bulbushälfte angehörte, untersucht werden.

Bei den Augen Nr. 50—55 wurden Streifen, die in äquatorialer Richtung aus der Aequatorgegend ausgeschnitten waren, untersucht, und zwar jeweils ein Streifen aus der oberen und ein Streifen aus der unteren Bulbushälfte. Bei den Augen Nr. 57—59 wurden Aequatorialstreifen aus der Aequatorgegend untersucht, und zwar war jeweils ein Streifen dem oberen nasalen, oberen temporalen, unteren nasalen und unteren temporalen Quadranten entnommen. Bei den Augen Nr. 60, 61, 63 und 64 wurden Streifen untersucht, die in äquatorialer Richtung ausgeschnitten waren, und zwar war jeweils ein Streifen dem oberen vorderen, oberen hinteren, unteren vorderen und unteren hinteren Bulbusviertel entnommen.

Beim Auge Nr. 32 wurde ein Cornealstreifen untersucht.

Mit diesen 61 Schweinsaugen wurden 3 verschiedene Meßreihen durchgeführt.

1. Meßreihe.

Die 1. Meßreihe umfaßt die Messungen an 213 Streifen. Es kamen bei dieser Meßreihe die Augen Nr. 3—8, 10—42 und 48—64 zur Untersuchung. Jeder Streifen wurde 4mal hintereinander belastet. Bei der 1. Belastung wurde zunächst mit 1 g, dann mit 2 g belastet, bei der 2. Belastung

mit 1 g, 2 g, 3 g, bei der 3. Belastung mit 1 g, 2 g, 3 g, 4 g, bei der 4. Belastung nur mit 1 g. Es ergab sich, daß schon bei diesen geringen Belastungen die Dehnung mit wachsender Belastung abnimmt. Ferner treten schon bei den kleinsten Belastungen Dehnungsrückstände auf, die $^1/_4$ bis $^1/_2$ der vorhergehenden Dehnung ausmachen.

Im folgenden gebe ich das Protokoll für einen Streifen wieder. Es handelt sich dabei um den Streifen aus dem unteren nasalen Quadranten des Auges Nr. 25.

Belastung in g	**1**	**2**	**3**	**4**
Streifenlänge in mm bei der				
1. Belastung . . .	**16,116**	**16,241**	—	—
2. Belastung . . .	**16,187**	**16,288**	**16,359**	—
3. Belastung . . .	**16,253**	**16,366**	**16,383**	**16,430**
4. Belastung . . .	**16,306**	—	—	—

Zur besseren Uebersichtlichkeit wurden diese Ergebnisse graphisch festgelegt. Die Länge des Skleralstreifens wurde auf der Abszisse, die Belastung auf der Ordinate eingetragen. Eine Wiedergabe aller Protokolle oder der daraus gewonnenen Kurven ist wegen der großen Anzahl, es sind 213 Stück, nicht möglich. Eine teilweise Wiedergabe oder ein Auszug würde doch keinen richtigen Einblick in die Messungsergebnisse gewähren. Ich will daher die Ergebnisse an dieser Stelle lediglich mit einigen Worten kurz anführen. Die Messungsergebnisse der einzelnen Streifen sind so verschieden wie nur möglich. Die Dehnung wie der Dehnungsrückstand zeigen starke Schwankungen. Die Dehnung bei den stärker dehnbaren Streifen ist doppelt bis dreifach so groß als die Dehnung bei den weniger dehnbaren Streifen. Ebenso verhält es sich mit den Dehnungsrückständen. Ich habe nun versucht, die 213 Kurven nach den verschiedensten Gesichtspunkten zu gruppieren. So habe ich bei den Meridionalstreifen alle Streifen aus dem oberen nasalen Quadranten den Streifen aus dem oberen temporalen bzw. unteren nasalen bzw. unteren temporalen Quadranten gegenübergestellt. Ich habe die Meridionalstreifen mit den Aequatorial-

streifen verglichen. Ich habe die Streifen aus den Augen der Schweine von 1 Jahr und darüber den Streifen aus den Augen jüngerer Schweine gegenübergestellt. Ich habe eine Gruppierung nach der Streifendicke versucht. Bei dem Auge Nr. 56 habe ich nach einer Verschiedenheit der Dehnbarkeit der Streifen aus der vorderen und hinteren Bulbushälfte gesucht. Bei all diesen Versuchen ergab sich nie, daß die Schwankungsbreite der einen Gruppe von der der anderen Gruppe so verschieden war, daß man hätte behaupten dürfen, die Dehnbarkeit sei bei den einander gegenübergestellten Gruppen von Skleralstreifen eine verschiedene. Die Schwankungen sind so groß, daß bei einer Gruppierung nach der Länge der Streifen nur gerade noch erkennbar ist, daß längere Streifen stärker gedehnt werden als kürzere. Bei den Augen Nr. 18 und 37, die erst 1 Tag nach der Schlachtung zur Untersuchung kamen, war die Dehnung fast bei allen Streifen größer als dem Durchschnitt entsprechend. Auffällig groß wurde die Dehnung und vor allem auch die Dehnungsrückstände bei dem Auge Nr. 19, das erst 2 Tage nach der Schlachtung untersucht wurde. Besonders wesentlich erscheinen mir die Untersuchungsergebnisse aus den Augen Nr. 48 und 49. Bei dem Auge Nr. 48 hatte ich alle Streifen so eingespannt, daß die normale Krümmung der Streifen übertrieben ausgeglichen wurde. Es sei hier daran erinnert, daß die Skleralstreifen ja keine Ausschnitte aus einem ebenen Gebilde, sondern solche aus einer Hohlkugel sind. Die an und für sich schon kürzere Innenfläche der Streifen wurde also besonders stark belastet. Beim Auge Nr. 49 ging ich gerade umgekehrt vor. Hier wurde beim Einklemmen die natürliche Krümmung des Streifens noch übertrieben, also beim Dehnungsversuch die Außenseite des Streifens stärker belastet als die Innenseite. Bei allen Streifen dieser beiden Augen fanden sich eine sehr große Dehnung und sehr große Dehnungsrückstände. Dieses einheitliche Ergebnis zeigt, daß eine ungleichmäßige Verteilung der Spannung über den Streifenquerschnitt das Versuchsergebnis fälscht.

Ich verzichte hier bewußt auf Angabe von einzelnen Zahlen. Erst die Betrachtung aller 213 Kurven macht einen überzeugenden Eindruck. Nach der Messung an den ersten Streifen war ich selbst durchaus optimistisch eingestellt. Mit der Zunahme des untersuchten Materials wurde ich dann zunehmend skeptischer.

2. Meßreihe.

Die 2. Meßreihe umfaßt 81 Streifen, die den Augen Nr. 22—42 entstammen. An allen diesen Streifen wurden vorher die Messungen der 1. Meßreihe durchgeführt. Bei dieser Versuchsreihe wurde der Streifen mit 51 g belastet und die Länge des Streifens 30, 60, 120 und 240 sec. nach der Belastung gemessen. Dann wurde der Streifen mit nur 1 g belastet und wiederum die Länge des Streifens nach 30, 60, 120 und 240 sec. nach dieser Entlastung gemessen. Diese Versuchsreihe führte ich durch, um die Abhängigkeit der Dehnung von der Zeit festzustellen. Es war dabei allerdings nicht möglich, mit so geringen Belastungen wie bei der 1. Versuchsreihe zu arbeiten, da sonst die Aenderungen der Streifenlänge zu klein gewesen wären, als daß sie mit der vorhandenen Versuchsanordnung meßbar gewesen wären.

Auch für diese Meßreihe gebe ich ein Beispiel wieder, und zwar die Meßergebnisse für den Streifen aus dem oberen nasalen Quadranten des Auges Nr. 30.

Streifenlänge vor Ausführung der Messung für die 1. Meßreihe bei Belastung mit 1 g: 16,175.

Streifenlänge nach Ausführung der Messung für die 1. Meßreihe bei Belastung mit 1 g: 16,264.

Belastung mit 51 g

Zahl der sec. nach der Belastung	**30**	**60**	**120**	**240**
Streifenlänge in mm	**16,903**	**16,920**	**16,938**	**16,950**

Belastung mit 1 g

Zahl der sec. nach der Belastung	**30**	**60**	**120**	**240**
Streifenlänge in mm	**16,501**	**16,489**	**16,471**	**16,459**

Zur besseren Uebersichtlichkeit wurde auch bei dieser Meßreihe das Meßergebnis für jeden Streifen graphisch dargestellt. Die Zeit wurde dabei auf der Abszisse, die Streifenlänge auf der Ordinate abgetragen. Aus obigem Beispiel ist ersichtlich, daß

die Streifenlänge bei konstanter Belastung mit der Zeit zunimmt bzw. nach der Entlastung noch über längere Zeit hin abnimmt. Diese Zu- bzw. Abnahme wird für gleiche Zeiträume mit zunehmender Zeit immer kleiner. Sie beträgt in der Zeit von der 30.—60. sec. 0,017 mm, von der 60. –120. sec., also im doppelten Zeitraum als dem vorigen, 0,018 mm, von der 120.—240. sec., also im vierfachen Zeitraum als dem ersten, 0,012 mm. Aehnlich verhält es sich mit der Abnahme der Länge nach der Entlastung. Die Längenabnahme in den entsprechenden Zeiträumen beträgt 0,012 mm, 0,018 mm und 0,012 mm. Diese gemessenen Längenunterschiede liegen wohl schon ziemlich dicht an der Fehlergrenze, mit der die Versuchsanordnung arbeitet. Da aber alle 81 Kurven in dieser Hinsicht dieselbe Tendenz zeigen, so wird der Mangel der Meßgenauigkeit durch die Anzahl der Versuche ausgeglichen. Die Streifenlänge beträgt nun bei Beginn des Versuches 16,264 mm, bei Beendigung 16,459 mm, mithin war 240 sec. nach der Entlastung immer noch ein Dehnungsrückstand von 0,195 mm vorhanden. Dieser Dehnungsrückstand ist wohl nur zum kleinsten Teil als reversibler, elastischer Dehnungsrückstand aufzufassen, zum größten Teil handelt es sich dabei um eine plastische, irreversible Formveränderung. Besonders deutlich wird dies bei Betrachtung der Dehnungskurven dieser Versuchsreihe. Man sieht, daß sich die Dehnungskurven einem Grenzwert für die Streifenlänge nähern, der wesentlich größer ist als die ursprüngliche Länge.

Im übrigen gilt für diese Meßreihe das gleiche wie für die 1. Meßreihe. Dehnung und Dehnungsrückstand sind bei den einzelnen Streifen sehr verschieden, wenn auch die Schwankungen verhältnismäßig nicht ganz so groß sind wie bei der 1. Meßreihe. Ich habe auch hier versucht, durch verschiedene Gruppierungen der Dehnungskurven eine Ordnung in die Messungsergebnisse zu bringen. Dies war aber ebenso vergeblich wie bei der 1. Meßreihe.

3. Meßreihe.

Die 3. Meßreihe umfaßt 72 Streifen. Die Streifen entstammten den Augen Nr. 43—47 und 50—64. Die Streifen aus den Augen Nr. 43—47 wurden nur zu dieser Meßreihe verwendet. An den Streifen aus den Augen Nr. 48—64 wurden vor Ausführung der

Messungen dieser Meßreihe die Messungen der 1. Meßreihe durchgeführt. Bei dieser Meßreihe wurde stufenweise bis zu einer Gesamtbelastung von 26 g belastet. Zwischen 1 und 10 g betrug der Unterschied zwischen den einzelnen Belastungsstufen 1 g, zwischen 10 und 26 g betrug er 2 g. Jeder Streifen wurde in dieser Weise zweimal hintereinander belastet. Als dritte Belastung wurde dann jedesmal mit 1 g belastet. Da bei dieser Meßreihe für jeden Streifen also 37 Einzelablesungen nötig waren, wurde hier zwischen Belastung und Ablesung jeweils nur 1 Minute gewartet, da sonst die Durchmessung eines Streifens zu lange Zeit beansprucht hätte. Es fand sich auch hier, daß die Dehnung mit wachsender Belastung abnimmt. Eine Gruppierung der Ergebnisse mißlang ebenso wie bei den beiden vorigen Versuchsreihen. Lediglich der Einfluß der Streifenlänge tritt bei dieser Versuchsreihe deutlicher in Erscheinung als bei der 1. Reihe. Die Längenänderung bei verschieden langen Streifen erweist sich ungefähr proportional der Streifenlänge.

4. Meßreihe.

Die 4. Meßreihe umfaßt 19 Streifen aus den Augen Nr. 65—72, also aus den 8 menschlichen Augen. Der Abstand der Einspannklammern betrug hier immer 15 mm. Die Nr. 65, 66, 68, 69, 71 und 72 waren Leichenaugen. Die Nr. 65 und 66 waren Paaraugen von einer 6monatl. Totgeburt. Wegen der Kleinheit des Objektes konnte aus jedem Auge nur ein Aequatorialstreifen untersucht werden. Die Augen Nr. 68 und 69 stammten von einer 47jährigen Frau. Es standen nur die hinteren Kalotten zur Verfügung. Es wurde jeweils ein Aequatorialstreifen aus der oberen und unteren Bulbushälfte untersucht. Die Augen Nr. 71 und 72 stammten von einem 73jährigen Mann. Von dem Auge Nr. 71 wurde je ein Aequatorialstreifen aus der oberen und unteren Bulbushälfte untersucht. Von Auge Nr. 72 wurde je ein Meridionalstreifen aus dem oberen nasalen, oberen temporalen, unteren nasalen und unteren temporalen Quadranten untersucht. Die Augen Nr. 67 und 70 waren operativ entfernte Augen. Bei Auge Nr. 67 handelte es sich um ein Glaucoma absolutum bei einer 76jährigen Frau. Aus der unteren Bulbushälfte, die mir zur Verfügung stand, wurden 4 Meridionalstreifen untersucht. Bei Auge Nr. 70 handelte es sich um ein Glaucoma absolutum secundarium bei einem 36jährigen Mann. Es

wurde je ein Meridionalstreifen aus dem oberen nasalen und oberen temporalen Quadranten und ein Aequatorialstreifen aus der unteren Bulbushälfte untersucht. Diese Meßreihe wurde genau wie die 1. Meßreihe durchgeführt. Lediglich bei der dritten Belastung wurde über die Belastung mit 4 g hinausgegangen und mit 5, 6 und 7 g belastet. Auch die Ergebnisse dieser Meßreihe wurden graphisch dargestellt. Diese wenigen Kurven unterstrichen das Ergebnis der 1. Meßreihe. Neue Gesichtspunkte gegenüber der 1. Meßreihe traten nicht auf.

Zusammenfassung.

Die Ergebnisse meiner Dehnungsversuche an 1 mm breiten Skleralstreifen sind in Kürze folgende:

Die Dehnung der Streifen nimmt mit wachsender Belastung stetig ab.

Schon bei geringer Belastung treten erhebliche Dehnungsrückstände auf, die in der Hauptsache auf eine plastische Verformung zurückzuführen sind.

Ungleichmäßige Verteilung der Spannung über den Streifenquerschnitt verfälscht das Versuchsergebnis; Dehnung und Dehnungsrückstand werden dabei erheblich größer.

Streifen aus Augen, die erst 24 und mehr Stunden nach der Schlachtung untersucht werden, zeigen größere Dehnung und Dehnungsrückstände als frische Augen.

Dehnung und Dehnungsrückstände zeigen bei verschiedenen Streifen starke Schwankungen.

Diese Schwankungen sind bei geringerer Belastung (bis zu 4 g) so groß, daß nur gerade noch erkennbar ist, daß die Längenzunahme längerer Streifen größer ist als die kürzerer. Bei größerer Belastung (bis zu 25 g) ist die Längenzunahme ungefähr proportional der Streifenlänge.

Irgendwelche Gesetzmäßigkeit bei diesen Schwankungen läßt sich nicht feststellen. Eine Abhängigkeit der Dehnung von der Streifendicke, die bei jedem einzelnen Streifen über die Versuchslänge weg erheblich wechselt, ist nicht auffindbar. Eine Verschiedenheit der Dehnbarkeit der Streifen aus verschiedenen Skleralgebieten läßt sich nicht nachweisen. Ebenso läßt sich

keine Abhängigkeit der Dehnbarkeit der Streifen vom Alter feststellen. 2 Glaukomaugen zeigen keine nachweisbare Aenderung der Dehnbarkeit der Skleralstreifen.

Zum letzten kann ich schließlich meine Ergebnisse nicht besser zusammenfassen, als es Weber (15) bereits 1877 tat: „Ich habe eine große Anzahl solcher Messungen ausgeführt, aber je größer die Anzahl wurde, um so abweichender das Resultat, so daß ein Mittel daraus zu ziehen und als Elastizitätsmodul der Sklera hinzustellen, mir ein mathematischer Unsinn schien." Trotzdem mir eine wesentlich feinere Apparatur mit von mir noch weiter verfeinerten Ablesebedingungen zur Verfügung stand, erfüllte sich unsere Hoffnung, damit in der Frage der Bestimmung der Dehnung bzw. des Elastizitätsmoduls des Skleralgewebes weiterzukommen oder sie gar zu klären, in keiner Weise.

Wie kommt es, daß diese Untersuchungsmethode, die doch in der Technik bei der Prüfung der verschiedensten Stoffe so Vollendetes leistet, hier restlos versagt? Der Grund dafür liegt in der Hauptsache in der Art und Form des zu untersuchenden Materials. Bei der Werkstoffprüfung in der Technik ist man in der Lage, den zu prüfenden Stoff, sei es Textilgewebe, seien es Metalldrähte oder sonst ein Werkstoff, weitgehend den Versuchsbedingungen anzupassen. Beim Skleralgewebe ist dies kaum irgendwie möglich. Schon beim Ausschneiden der Streifen greift man stark in den anatomischen Aufbau des Gewebes ein. Sodann ist es nicht möglich, gerade Streifen zu untersuchen, sondern die Streifen sind immer gekrümmt, da sie ja aus einer Hohlkugel ausgeschnitten sind. Dies hat einmal zur Folge, daß die Spannung in den Streifen fast nie über den Streifenquerschnitt gleichmäßig verteilt ist. Eine Seite wird so gut wie immer stärker gedehnt werden als die andere. Ferner aber wird bei den Dehnungsversuchen immer gleichzeitig eine Verbiegung des Streifens mit einhergehen. Bei Belastung wird der Streifen mehr nach der geraden Richtung hin gestreckt, bei Entlastung wird er wieder seine Krümmung annehmen wollen. Die wechselnde Streifendicke muß den Dehnungs- wie den Verbiegungsvorgang weiterhin komplizieren. Ein weiterer Uebelstand ist der, daß der Streifen eingeklemmt werden muß. Man kann in keiner Weise Aussagen darüber machen, was sich beim Dehnungsvorgang in unmittelbarer Nähe der Klemmstellen ereignet. Bei der Werkstoffprüfung in der Technik läßt sich diese Fehlerquelle durch die ver-

schiedensten Anordnungen vermeiden, die jedoch alle für das Skleralgewebe nicht anwendbar sind. Wäre nur der eine oder andere der störenden Faktoren vorhanden, so könnte man durch entsprechend gewählte Versuchsreihen den dadurch gemachten Fehler eliminieren. Eine gegenseitige Aussiebung aller möglichen Fehler ist indessen bei ihrer Vielheit und ihrem teilweise verwickelten Ineinandergreifen nicht möglich.

Die Methode der Untersuchung isolierter Skleralstreifen kann also keinen Aufschluß geben über die Dehnungsverhältnisse des Skleralgewebes. Selbst wenn diese Untersuchungen ein besseres Ergebnis gezeitigt hätten, wäre eine Uebertragung des Ergebnisses auf die Augapfelhülle als Ganzes betrachtet aus zwei Gründen schwierig. Einmal ist die Querkontraktion des Skleralgewebes nicht bekannt und zweitens hat die Augapfelhülle die Möglichkeit bei einer Druckerhöhung sich als Ganzes auszudehnen, aber sie kann dem erhöhten Druck auch dadurch ausweichen, daß sie sich mehr der Kugelgestalt anpaßt.

Herrn Prof. Dr. Schmelzer danke ich für die Ueberlassung dieses interessanten Themas, sowie für die ständige Anteilnahme und Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Eine Veröffentlichung des gesamten Zahlenmaterials oder der daraus gewonnenen Kurven würde zu weit führen. Ich habe daher die Kurven, wie die Versuchsprotokolle im Laboratorium der Erlanger Universitäts-Augenklinik hinterlegt, wo sie jederzeit eingesehen werden können.

Literaturverzeichnis.

1. Busemann A. u. Föppl O.: Physikalische Grundlagen der Elastomechanik. Handbuch der Physik, herausgegeben von H. Geiger u. K. Scheel. Band VI. Mechanik der elastischen Körper (1928).
2. Casolino L.: Ricerche sperimentali sulla distensibilità della sclera in rapporto all'età (Experimentelle Untersuchungen über die Dehnbarkeit der Sklera in verschiedenen Altersstufen). Ann. di ottalmol. e clin. oculist. Jg. 54, H. 5, 490—514 (1926). Zitiert nach Zentralbl. f. d. ges. Ophthalm. 17, S. 59—60 (1927).
3. Heymann H.: Experimentelle Untersuchungen über die Festigkeit und Dehnbarkeit der Sklera von Schweinsaugen. Inaugural-Dissertation, Erlangen (1935).
4. Ischreyt G.: Zur Mechanik der Sklera. Graefes Arch. 46, S. 677—705 (1898).
5. — Anatomische und physikalische Untersuchungen der Rindersklera. Graefes Arch. 48, S. 384—419 (1899).
6. — Kritische Bemerkungen zu Herrn Prof. W. Kosters Gzn. Aufsatz: Beiträge zur Tonometrie und Manometrie des Auges. Graefes Arch. 48, S. 694—698 (1899).
7. Koster Gzn. W.: Beiträge zur Tonometrie und Manometrie des Auges. Graefes Arch. 41, II. S. 113—158 (1895).
8. — Zur Untersuchung der Elastizität der Sklera. Graefes Arch. 49, S. 448—455 (1900).
9. Mehmke R.: Zum Gesetz der elastischen Dehnung. Zeitschr. f. Math. u. Phys. 42, S. 327—338 (1897).
10. Pflugk A. von: Neue Wege zur Erforschung der Lehre von der Akkomodation. Graefes Arch. 120, S. 179—200 (1932).
11. Schulze u. Vollhardt: Werkstoffprüfung für Maschinen und Eisenbau (1923).
12. Sugomito S.: Experimentelle Untersuchungen über die mechanischen Eigenschaften der äußeren Bulbushülle. II. Ueber die Dehnbarkeit und die Festigkeit der äußeren Bulbushülle bei mit Lanolin gefütterten Kaninchen. Act. Soc. ophthalm. jap. 40, S. 576—603 (1936). Zitiert nach Zentralbl. f. d. ges. Ophthalm. 37, S. 329 (1937).
13. — Experimentelle Untersuchungen über die mechanischen Eigenschaften der äußeren Bulbushülle. III. Mitt. Ueber Dehnbarkeit und Festigkeit verschiedener Stellen der äußeren Bulbushülle. Act. Soc. ophthalm. jap. 40, S. 809—823 (1936). Zitiert nach Zentralbl. f. d. ges. Ophthalm. 37, S. 517—518 (1937).
14. Vogelsang K.: Ueber Elastizitätsmessungen am Auge. Arch. f. Augenheilk. 103, S. 357—423 (1930).
15. Weber A.: Die Ursache des Glaukoms. Graefes Arch. 23, I. S. 1—91 (1877).

Lebenslauf.

Ich, Hans Schwab, wurde am 13. Juni 1911 als Sohn des Bezirksoberpflegers Anton Schwab und seiner Ehefrau Anna, geb. Wrede, zu Erlangen geboren. Ich besuchte in Erlangen die Volksschule und das Humanistische Gymnasium, dessen Reifezeugnis ich am 10. April 1930 erwarb.

Vom Sommersemester 1930 bis zum Wintersemester 1932/33 studierte ich Naturwissenschaften, und zwar das Sommersemester 1932 in Berlin, alle übrigen Semester in Erlangen.

Im Sommersemester 1933 begann ich das medizinische Studium in Erlangen. Am 4. August 1934 bestand ich die ärztliche Vorprüfung, am 17. April 1937 die ärztliche Prüfung. Während des medizinischen Studiums war ich immer an der Universität Erlangen.

Vom 28. April 1937 bis zum 1. Dezember 1937 war ich als Medizinalpraktikant in der Erlanger Medizinischen Klinik, seit 2. Dezember 1937 in der mittelfränkischen Kreis-Heil- und -Pflegeanstalt Erlangen.